



## Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Apresentação</i> .....   | <i>IX</i> |
| <i>Prefácio</i> .....   | <i>XI</i> |
| <br>  |           |
| <i>Capítulo 1 A Necessidade de Modernização da Rede Elétrica (Bruno de Nadai Nascimento, Eliane de Lorenci, Joseph Schumann Minami)</i> ..... | <i>1</i>  |
| 1.1 Introdução .....  | 2         |
| 1.2 Perspectiva Holística .....   | 4         |
| 1.3 <i>Stakeholders</i> .....   | 6         |
| 1.4 Principais Componentes .....  | 8         |
| 1.4.1 Geração Distribuída .....   | 9         |
| 1.4.2 Dispositivos Armazenadores .....  | 9         |
| 1.4.3 Eletrônica de Potência .....  | 10        |
| 1.4.4 Sistema Integrado de Comunicação .....  | 10        |
| 1.5 Barreiras Frente à Expansão da Geração Distribuída e Desenvolvimento de Redes Inteligentes .....  | 13        |
| 1.6 Estudo de Caso – Modelo Americano .....   | 15        |
| 1.6.1 Domínio Cliente .....   | 17        |
| 1.6.2 Domínio Geração .....   | 19        |
| 1.6.3 Domínio Transmissão .....   | 21        |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.6.4 Domínio Distribuição .....  | 22        |
| Referências .....   | 24        |
| <br>  |           |
| <i>Capítulo 2 Tecnologias da Informação e Telecomunicações:<br/>Medições, Controle, Gerenciamento e Segurança para<br/>Redes Elétricas (Guilherme Rosse Ramalho) .....</i>  | <i>27</i> |
| 2.1 Introdução .....  | 28        |
| 2.2 Aplicações para Redes Elétricas Inteligentes .....  | 29        |
| 2.3 Redes de Comunicações .....   | 30        |
| 2.4 Características de Desempenho .....   | 32        |
| 2.5 Conceitos Tecnológicos .....  | 32        |
| 2.5.1 Requerimentos de Comunicações e Aplicações ..   | 33        |
| 2.6 Tecnologias de Comunicação para <i>Smart Grids</i> .....  | 33        |
| 2.6.1 Protocolos em Camadas .....   | 36        |
| 2.6.2 Tecnologias de Camada de Enlace de Dados. ...   | 38        |
| 2.7 Protocolo de Internet (IP – Internet Protocol) .....  | 54        |
| 2.8 Estudo de Caso – Monitoramento Remoto de Perfil<br>de Tensão .....  | 58        |
| 2.8.1 Desenvolvimento de Interface de Aplicação –<br>CERin Monit. ....  | 60        |
| 2.5.2 Resultados dos Testes .....   | 62        |
| 2.5.3 Análise dos Resultados .....  | 62        |
| 2.6 Conclusão .....   | 63        |
| Referências .....   | 64        |
| <br>  |           |
| <i>Capítulo 3 Eletrônica de Potência para Geração Renovável<br/>Distribuída, Armazenamento de Energia e Inércia Virtual<br/>(Cristian Adolfo Alvez, Jonattan Emanuel Sarmiento,<br/>Juliana Ribas Monteiro) .....</i> | <i>67</i> |
| 3.1 Introdução .....  | 67        |
| 3.2 Eletrônica de Potência. ....  | 69        |
| 3.2.1 Estrutura Geral .....   | 70        |
| 3.2.2 Dispositivos .....  | 71        |
| 3.2.3 Topologias .....  | 72        |
| 3.2.4 Aplicações .....  | 76        |
| 3.3 Armazenamento de Energia .....  | 78        |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.3.1 | Tecnologias de Armazenamento . . . . .                                   | 80  |
| 3.3.2 | Aplicações do Armazenamento de Energia . . . . .                         | 89  |
| 3.4   | Inércia Virtual . . . . .  | 92  |
| 3.4.1 | A Importância da Inércia nos Sistemas Elétricos<br>de Potência . . . . . | 92  |
| 3.4.2 | Estratégias de Controle com Inércia Virtual . . . . .                    | 95  |
|       | Referências . . . . .  | 102 |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| <i>Capítulo 4 Considerações sobre Operação e Estabilidade de Microrredes (Maíra R. Monteiro, Yuri R. Rodrigues, Gabriel Alvarenga) . . . . .</i> |   | <i>105</i> |
| 4.1  | Introdução . . . . .  | 105        |
| 4.2  | Flexibilização do Sistema . . . . .                             | 106        |
| 4.2.1  | Flexibilização do Fornecimento de Energia . . . . .             | 106        |
| 4.2.2  | Flexibilização da Demanda . . . . .                             | 107        |
| 4.2.3  | Flexibilização da Rede . . . . .                                | 107        |
| 4.2.4  | Flexibilização do Armazenamento . . . . .                       | 108        |
| 4.2.5  | Flexibilização do Mercado de Energia . . . . .                  | 108        |
| 4.3  | Efeitos para Operação no Nível da Distribuição . . . . .        | 108        |
| 4.3.1  | Capacidade de Hospedagem . . . . .                              | 111        |
| 4.4  | Efeitos para Operação no Nível da Transmissão . . . . .         | 112        |
| 4.5  | Métodos para Análise Estática de Microrredes . . . . .          | 113        |
| 4.5.1  | Modelo da Geração Renovável no Fluxo de<br>Potência . . . . .   | 113        |
| 4.5.2  | Formulação do Fluxo de Potência Tradicional . . . . .           | 114        |
| 4.5.3  | Fluxo de Potência para Microrredes de<br>Distribuição . . . . . | 116        |
| 4.5.4  | Controle Primário <i>Droop</i> . . . . .                        | 119        |
| 4.5.5  | Controle Secundário . . . . .                                   | 120        |
| 4.6  | Índices de Estabilidade . . . . .                               | 121        |
| 4.6.1  | Curva PV . . . . .  | 121        |
| 4.6.2  | Vetor Tangente . . . . .  | 123        |
| 4.6.3  | Curva QV . . . . .  | 124        |
| 4.6.4  | Segurança Operativa do Sistema . . . . .                        | 126        |
| 4.7  | Reconfiguração da Rede . . . . .                                | 127        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 4.7.1  | Recoordenação da Proteção . . . . .                        | 127        |
| 4.8  | Visão do Futuro SEP e FR. . . . .                          | 128        |
| 4.8.1  | Desafios a Curto Prazo – Baixa Integração FR . . . . .     | 128        |
| 4.8.2  | Desafios a Médio Prazo – Média Integração FR. . . . .      | 128        |
| 4.8.3  | Desafios a Longo Prazo – Alta Integração FR . . . . .      | 129        |
|  | Referências . . . . .                                      | 129        |
| <br>   |  |            |
| <i>Capítulo 5 Aspectos e Desafios Regulatórios (Priscila Mayara Duarte dos Santos). . . . .</i>                                    |  | <i>131</i> |
| 5.1  | Introdução . . . . .                                       | 131        |
| 5.2  | Motivação para Implantação das Redes Inteligentes. . . . . | 136        |
| 5.3  | Impacto e Desafio Regulatório . . . . .                    | 138        |
| 5.4  | Principais Aspectos Regulatórios no Brasil . . . . .       | 142        |
| 5.5  | Redefinição do Marco Regulatório . . . . .                 | 144        |
| 5.5.1  | Visão da ANEEL . . . . .                                   | 145        |
| 5.6  | Políticas Públicas . . . . .                               | 147        |
| 5.7  | Situação Atual do Brasil. . . . .                          | 149        |
| 5.8  | A Experiência Regulatória Internacional. . . . .           | 152        |
| 5.8.1  | Estados Unidos . . . . .                                   | 152        |
| 5.8.2  | Reino Unido. . . . .                                       | 154        |
| 5.8.3  | Itália. . . . .  | 155        |
| 5.8.4  | Outros países . . . . .                                    | 156        |
|  | Referências . . . . .                                      | 157        |
| <br>   |  |            |
| <i>Capítulo 6 Redes Inteligentes no Brasil e no Mundo (João Alves da Silva Neto, Matheus Ferreira Zambroni de Souza) . . . . .</i> |  | <i>161</i> |
| 6.1  | Introdução . . . . .                                       | 161        |
| 6.2  | Redes Inteligentes no Brasil – Distribuição. . . . .       | 163        |
| 6.2.1  | Companhia Energética de Minas Gerais – Cemig . . . . .     | 163        |
| 6.2.2  | Ampla Energia e Serviços S.A. . . . .                      | 164        |
| 6.2.3  | Light Serviços de Eletricidade S.A. . . . .                | 166        |
| 6.2.4  | Companhia Energética de Pernambuco – CELPE . . . . .       | 167        |
| 6.2.5  | Eletrobras Amazonas Energia . . . . .                      | 168        |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 6.2.6  | AES Eletropaulo . . . . .                                      | 168 |
| 6.2.7  | EDP Bandeirante . . . . .                                      | 169 |
| 6.2.8  | CPFL – Companhia Paulistana de Força e Luz. . . . .            | 170 |
| 6.2.9  | Coelce – Companhia Energética do Ceará . . . . .               | 170 |
| 6.2.10 | Copel – Companhia Paranaense de Energia . . . . .              | 171 |
| 6.3    | Redes Inteligentes no Brasil – Transmissão e Geração . . . . . | 171 |
| 6.4    | Redes Inteligentes no Mundo. . . . .                           | 173 |
| 6.4.1  | Estados Unidos . . . . .                                       | 174 |
| 6.4.2  | Canadá . . . . .   | 175 |
| 6.4.3  | Japão. . . . .   | 175 |
| 6.4.4  | Austrália . . . . .  | 176 |
| 6.4.5  | China . . . . .  | 176 |
| 6.4.6  | Argentina . . . . .  | 177 |
| 6.4.7  | Colômbia . . . . .   | 177 |
| 6.4.8  | África do Sul . . . . .  | 178 |
| 6.4.9  | Reino Unido. . . . .   | 179 |
| 6.4.10 | Islândia. . . . .  | 179 |
| 6.4.11 | Alemanha . . . . .   | 180 |
| 6.4.12 | Espanha . . . . .  | 180 |
| 6.4.13 | França. . . . .  | 181 |
| 6.4.14 | Portugal . . . . .   | 181 |
| 6.4.15 | Itália . . . . .   | 182 |
| 6.5    | <i>Smart Grids</i> em Laboratórios . . . . .                   | 182 |
| 6.5.1  | Universidade Politécnica da Catalunha . . . . .                | 182 |
| 6.5.2  | Universidade Federal de Itajubá . . . . .                      | 185 |
| 6.5.3  | Cepel . . . . .  | 186 |
|        | Referências . . . . .  | 186 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| <i>Capítulo 7 Abordagem Filosófica e Visão Conceitual das Redes Elétricas Inteligentes (Pedro H. Naves Vasconcelos)</i> . . . . . |   | 191 |
| 7.1   | Introdução . . . . .  | 191 |
| 7.1.1   | A Complexidade dos Sistemas Elétricos do Futuro . . . . .           | 193 |
| 7.2   | Princípios Filosóficos e Possibilidades para a Engenharia . . . . . | 195 |
| 7.2.1   | Ética e Responsabilidade na Função do Engenheiro . . . . .          | 196 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 7.2.2 | Ferramental para Lidar com a Complexidade . . .                                | 197 |
| 7.2.3 | Dimensões Envolvidas . . . . .   | 198 |
| 7.2.4 | Identidade das Tecnologias Habilitadoras . . . . .                             | 201 |
| 7.2.5 | Interesses e Relações entre <i>Stakeholders</i> . . . . .                      | 204 |
| 7.2.6 | Integração de todos os Aspectos . . . . .                                      | 205 |
| 7.3   | Visão Conceitual das Redes Elétricas Inteligentes . . . . .                    | 206 |
| 7.3.1 | Conceitos Arquitetônicos . . . . .   | 208 |
| 7.3.2 | Conceitos Funcionais . . . . .   | 213 |
| 7.3.3 | Conceitos Tecnológicos . . . . .   | 219 |
| 7.3.4 | Mapeamento das Relações entre Conceitos<br>Funcionais e Tecnológicos . . . . . | 222 |
| 7.4   | Padrões e Referências Internacionais . . . . .                                 | 222 |
| 7.4.1 | O Modelo NIST . . . . .  | 224 |
| 7.4.2 | O Modelo SGAM . . . . .  | 230 |
| 7.5   | Considerações Finais . . . . .   | 236 |
|       | Referências . . . . .  | 236 |
|       | <i>Currículos dos Autores</i> . . . . .  | 239 |